

平成 30 年度採択
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業
戦略的基盤技術高度化支援事業

「高耐疲労高強度全天候型絶縁ロープの製造・点検技術の開発」

研究開発成果等報告書

令和3年5月

担当局 四国経済産業局
補助事業者 公益財団法人かがわ産業支援財団

目 次

第1章 研究開発の概要	.....	1
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	.....	1
1-2 研究体制	.....	3
1-3 成果概要	.....	5
1-4 当該研究開発の連絡窓口	.....	5
第2章 本論	.....	6
2-1 本事業の全体概要説明	.....	6
2-2 実施項目	.....	6
【1】耐疲労性能向上技術の開発	.....	6
【2】降雨時絶縁性能向上技術の開発	.....	11
【3】非破壊全長点検技術の開発	.....	13
第3章 全体総括	.....	19
3-1 研究開発成果	.....	19
3-2 研究開発後の課題・事業化展開	.....	19

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

(1) 研究開発の背景

送電線の老朽化により送電線の張替工事は、全国規模で計画的に進められている。電力送配電会社および施工会社は、より安全に高い品質で実施するため、当該工事において重要な役割を果たす「高強度型絶縁ロープ」の長寿命化と高信頼度化を求めている。

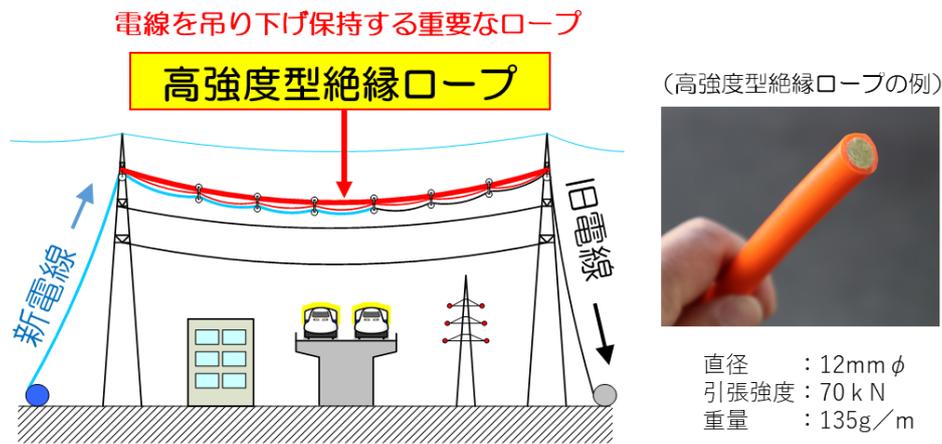


図1 老朽送電線の電線張替工法

従来の高強度型絶縁ロープの芯材として用いられているアラミド繊維は、高強度、軽量かつ低伸度等の優れた性能を有しているが、長期の使用による繊維間の摩耗によりロープの強度が低下することが課題として認識されるようになってきた。

しかし、これまでこの課題を克服し耐疲労性能を大幅に改善させた高強度型絶縁ロープはないため、今回、絶縁ロープに適した耐摩耗性の進化したスーパー繊維を探し出し、最新技術を活用して繊維と樹脂を複合化させることにより、高耐疲労高強度型絶縁ロープを開発することとした。合わせて、降雨時においても絶縁性能の低下が少なく、電氣的信頼性がより高い全天候型絶縁ロープを開発する。

また、高強度型絶縁ロープは絶縁性能確保のために樹脂被覆されているため、これまで全長にわたる電氣的性能、機械的性能の点検が困難であった。このため、外観点検技術を含めて、当該ロープの非破壊全長点検技術の開発を行う。

現状の課題を解決するための今回の研究開発内容を図2に示す。

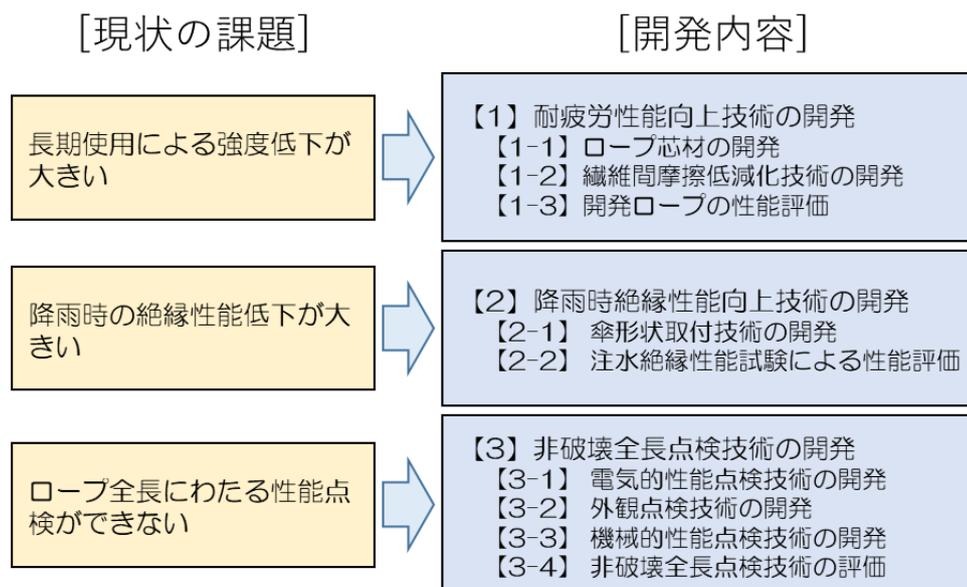


図 2 現状の課題に対する開発内容

(2) 研究目的及び目標

高木綱業は、「高強度型絶縁ロープ」の長寿命化と高信頼度化の要望に応えるべく、製造面においては耐疲労性能・絶縁性能を向上させた「高耐疲労高強度全天候型絶縁ロープ」の開発を行うとともに、点検サービス面で、高強度型絶縁ロープの「非破壊全長点検技術」の開発を行う。研究開発の高度化目標を以下に示す。

(研究開発の高度化目標)

- 【1】耐疲労性能向上技術の開発 : 従来技術ロープに比べ耐疲労性能 3 倍以上
- 【2】降雨時絶縁性能向上技術の開発 : 傘なしロープと比較して漏れ電流 1/2 以下,
注水耐電圧 2 倍以上
- 【3】非破壊全長点検技術の開発 : 非破壊で評価試験を行い、ロープの再使用可否
判断ができること

1-2 研究体制

(1) 研究組織・管理体制，協力者

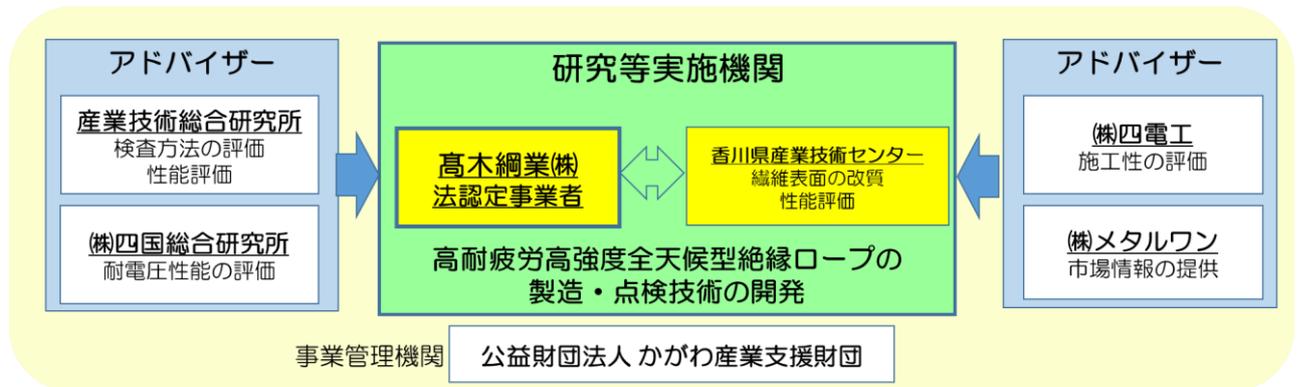


図3 実施体制

(2) 管理員及研究員

【補助事業者】 公益財団法人かがわ産業支援財団

管理員

氏名	所属・役職	実施内容
今雪 良智	技術振興部・参与兼部長	プロジェクト管理
石川 文彦	技術振興部 産学官連携推進課・主幹 (R2年8月28日～)	および委員会の開催
佐藤 恵子	技術振興部 産学官連携推進課・専門員	

【間接補助事業者】

研究員等

高木綱業株式会社

氏名	所属・役職	実施内容
高木 敏光	代表取締役社長 総括研究代表者 (PL)	【1-1】【1-2】【1-3】
寺田 英城	取締役 繊維ロープ部長	【2-1】【2-2】
藤岡 茂正	繊維ロープ部 さぬき工場長	【3-1】【3-2】【3-3】
森 利昭	繊維ロープ部 技術顧問	【3-4】
二神 誉夫	繊維ロープ部 技術・品質管理課長	
上北 嘉明	営業部 新プロダクト推進担当課長	
田中 優次	営業部 新プロダクト推進PJチーム	

香川県産業技術センター

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
佐々原 浩幸	次長 副総括研究代表者(SL) (R元年4月1日～)	【1-2】【1-3】【2-1】 【3-3】【3-4】
末澤 保彦	次長 副総括研究代表者(SL) (事業開始～R元年3月31日)	
白川 寛	主席研究員	

(3) 他からの指導者・協力者

国立研究開発法人産業技術総合研究所

氏名	所属・役職
高辻 利之	計量標準総合センター 研究戦略部 上席イノベーションコーディネータ(R2年4月1日～) 計量標準総合センター・工学計測標準研究部門 研究部門長 (事業開始～R2年3月31日)
矢野 哲夫	四国センター産学官連携推進室 テクニカルスタッフ (R2年4月1日～) イノベーションコーディネータ (事業開始～R2年3月31日)

株式会社四国総合研究所

氏名	所属・役職
新居 浩治	電力技術部・送電技術グループ長

株式会社四電工

氏名	所属・役職
湊 勝巳	電力本部建設部 建設統括課課長(R元年6月28日～)
西川 賢一	電力本部建設部 建設統括課課長 (事業開始～R元年6月27日)

株式会社メタルワン鉄鋼製品販売

氏名	所属・役職
和田 久生	東日本統括付 シニアマネジャー(R元年11月1日～) 硬鋼線特殊線事業部副事業部長(部長職) (事業開始～R元年10月31日)

1-3 成果概要

計画通り研究開発を実施し、次のとおり当初の目標を達成した。

【1】耐疲労性能向上技術の開発

ベクトラン繊維を用いるとともにロープ構造を改良することにより、従来ロープに比べ『耐疲労性能 3 倍以上』となるロープを開発した。

【2】降雨時絶縁性能向上技術の開発

『漏れ電流 1/2 以下、注水耐電圧 2 倍以上』となる傘形状付き絶縁ロープを開発した。

【3】非破壊全長点検技術の開発

外観、機械的性能および電気的性能を全長にわたって非破壊で点検する技術を開発し、使用済ロープの点検において『再使用の可否判断が可能』となる技術を開発した。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

高木綱業株式会社 繊維ロープ部

技術・品質管理課長 二神 誉夫

TEL : 087-867-2701 (代表)

FAX : 087-865-9903

E-mail : t.futagami@t2701.com

第2章 本論

2-1 本事業の全体概要説明

新技術開発のために必要な解決すべき課題を次の3点とし、図4に示す流れで研究開発を進めた。

- 【1】耐疲労性能向上技術の開発
- 【2】降雨時絶縁性能向上技術の開発
- 【3】非破壊全長点検技術の開発

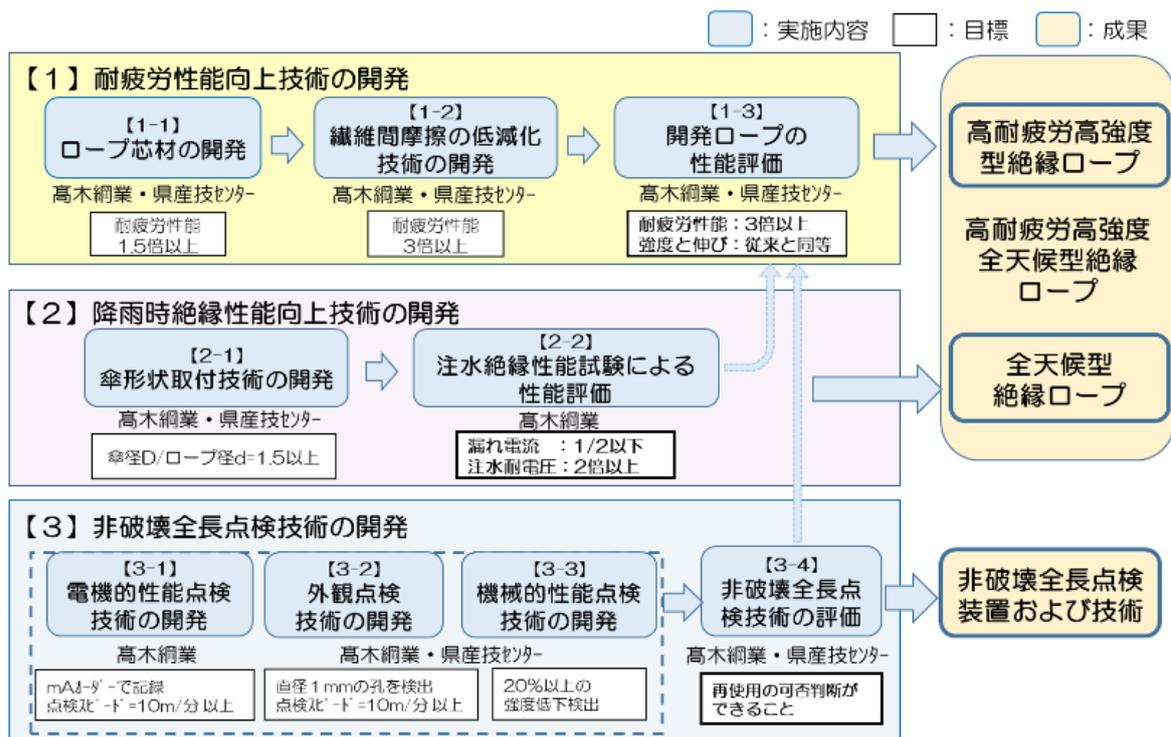


図4 研究開発の流れ

2-2 実施項目

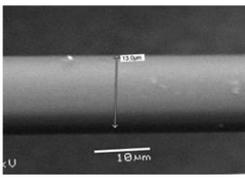
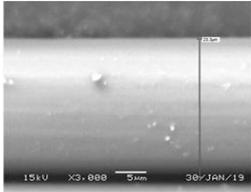
【1】耐疲労性能向上技術の開発

【1-1】ロープ芯材の開発（高木綱業，県産技センター）

ロープ芯材の開発は、まず繊維の引張試験および繰返し疲労試験などを行い、スーパー繊維（アラミド、ポリアリレート、高分子量ポリエチレン）の中から耐疲労性能に優れた繊維の選定を行った。

その結果、従来のアラミド繊維と同等の強度と耐熱性でありながら耐疲労性能にも優れたポリアリレート繊維を選定した。

表1 アラミド繊維とポリアリレート繊維の比較

繊維種類		アラミド	ポリアリレート
繊維	繊維外観 (電子顕微鏡)		
	繊維太さ	12.5 μm	22 μm
	比重	1.44	1.41
	軟化点	300℃以上	300℃以上
原糸	原糸番手	1670T/1000	1670T/300 ※
	原糸強度	383 N	383 N
	計算断面積	0.116 mm ²	0.118 mm ²
	繊維本数	1000 本	300 本

※ 原糸が300本の繊維からなり、その重さが10 kmで1,670 gであることを示す。

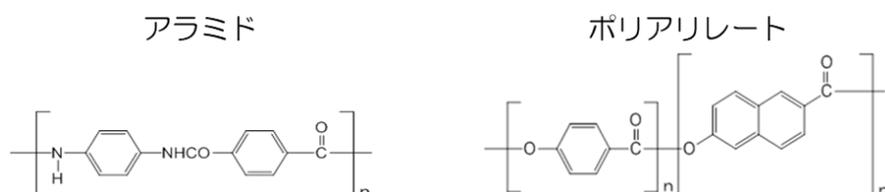


図5 アラミド繊維とポリアリレート繊維の化学構造

【1-2】繊維間摩擦の低減化技術の開発（高木綱業，県産技センター）

繊維への樹脂加工の当初の目的は、樹脂による繊維間摩擦の低減によるロープの耐疲労性能の向上であったが、ロープの開発を進める中で、ポリアリレート繊維が極めて滑り易く繊維の滑りを樹脂で抑制する必要となる場合も生じた。このため、繊維への樹脂塗工により繊維間の摩擦を適切に制御する技術を開発した。

繊維へ樹脂加工する場合、ポリアリレート繊維に大気圧プラズマ処理をすることで繊維表面が改質され濡れ性が向上し、樹脂が繊維に定着しやすくなる。プラズマ処理装置は、直径数mm程度の紐を処理してきたが、より効率的に処理するため図6に示すように処理の方式をAからB、Cへと改良し、ロープ芯材レベルの直径10mm程度のロープへも処理できる方式を開発した。

スーパー繊維に樹脂加工してロープとする場合には、樹脂を繊維に安定して定着させるためにプラズマ処理は必要な技術であるため、今後も研究開発を進める。

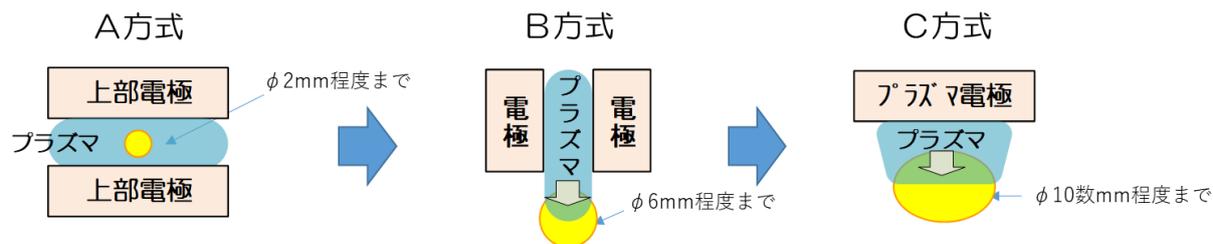


図6 大気圧プラズマ処理装置の改良

【1-3】開発ロープの性能評価（高木綱業，県産技センター）

① ロープの試作

ポリアリレート繊維を用いて、図7に示す試作品を製作し性能試験を実施した。その結果、図8、表2に示すとおり伸び、引張強度は従来品と同等であり、図9に示すように耐疲労性能は従来品の3倍を大幅に上回ることがわかった。特に試作品は、ワイヤーロープと比較しても耐疲労性能が上回り、ワイヤーロープの代替としても期待が持てる結果となった。

ロープは、耐疲労性能、引張強度、伸び、耐電圧性能、施工性、製造コスト等を総合的に評価する必要があるため、今回の事業で開発した各種試験装置を用いて試験を行うとともに、現場において施工試験を兼ねた実証試験を行った。

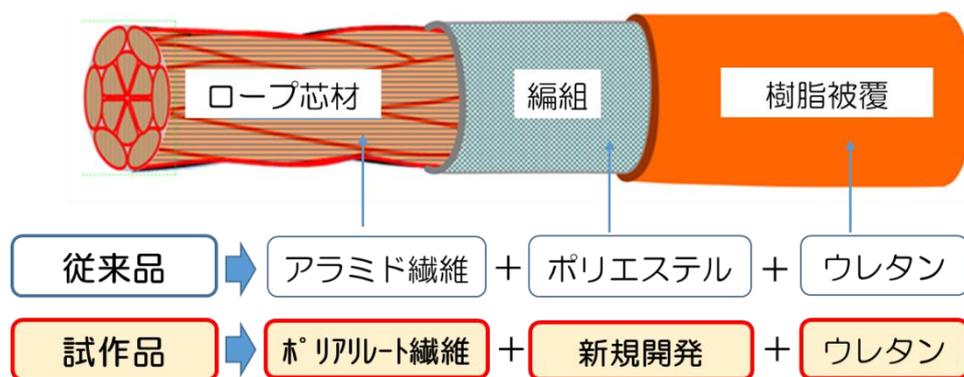


図7 ロープの試作

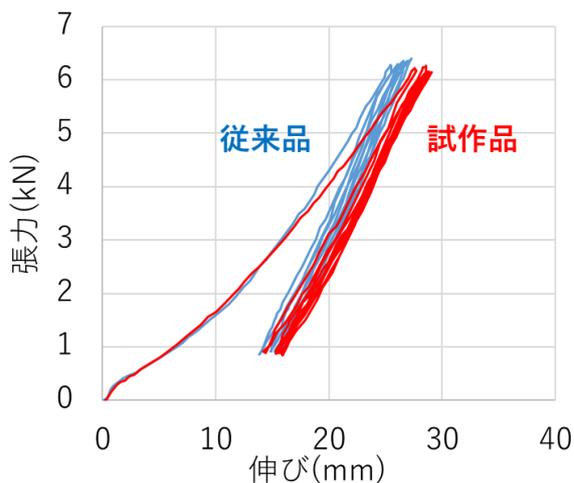


図8 張力・伸び試験結果の比較

表2 引張強度の比較

区分	繊維種類	引張強度(kN)
従来品	アラミド	82
試作品	ポリアリレート	85

(引張試験状況)



(疲労試験状況)

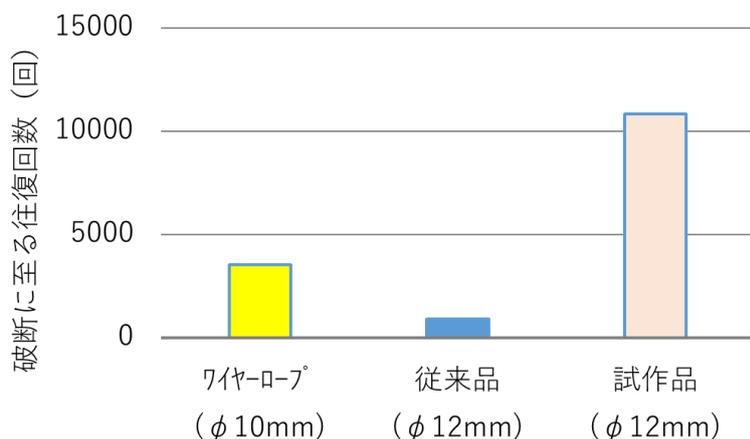


図9 繰返し疲労試験結果の比較



② 実証試験結果

従来品および試作品のロープを、四国電力送配電(株)の協力を得て図10に示すように令和2年11月16日から約70日間架設して、撤去後のウエイト位置やクランプ把持部の強度低下割合などを比較するとともに、施工性の問題点などを確認する目的で実証試験を行った。撤去後の各ロープの残存強度を試験した結果を図11に示す。従来品ではウエイト取付部とクランプ部で約10%程度の強度低下が認められたが、試作品では強度低下が認められず、試作品の耐疲労性能が高いことを確認した。また、(株)四電工の協力を得て、施工性に問題がないことを確認した。



図 10 実証試験状況

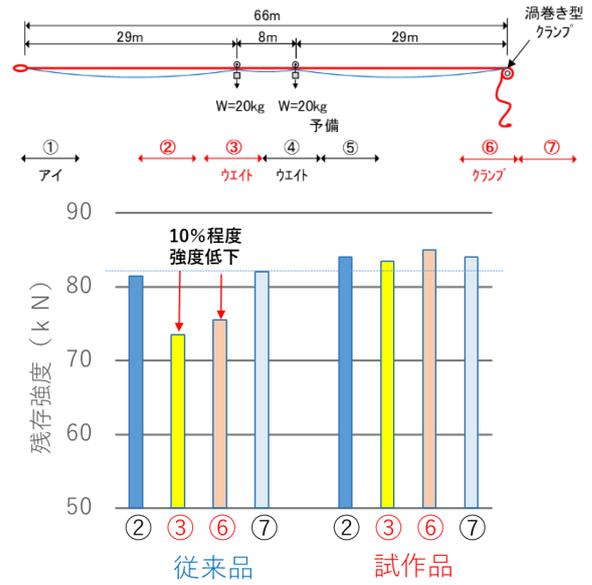


図 11 残存強度の比較

③ 絶縁性能ほかの評価と進め方

今回開発した試作品は、図 12 に示すように(株)四国総合研究所での注水しながら高電圧を印加する耐電圧試験などを通して、優れた絶縁性能を有していることを確認した。

今後、今回の開発で得られた高耐疲労性能、低伸び特性、高絶縁性能等の優れた特長を明確にし、製品としての完成度を高めるべく改良を進める。

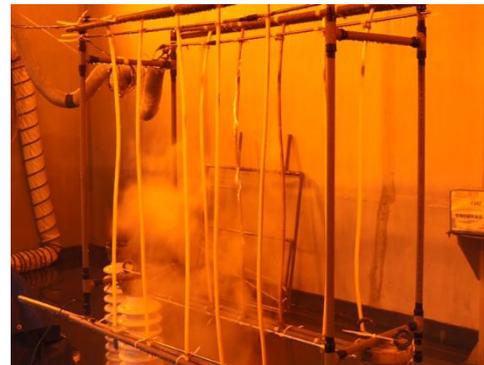


図 12 注水耐電圧試験状況

【2】降雨時絶縁性能向上技術の開発

降雨時には図 13 に示すようにロープに雨水が連なることより絶縁性能が大きく低下する。降雨時の絶縁性能を向上させるためには、雨水の連なりを防ぐ傘形状をロープに取り付けることが有効と考え、今回、最適な傘形状と傘形状取付生産技術を開発した。

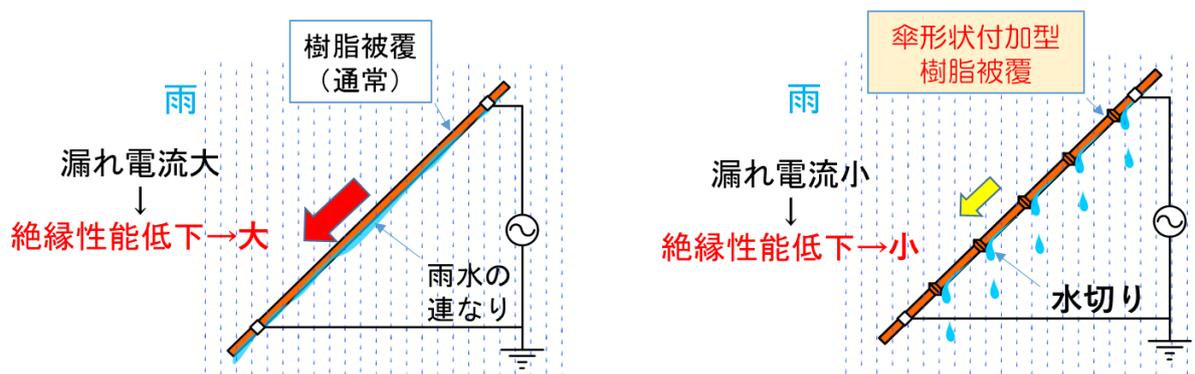


図 13 降雨時絶縁性能向上のメカニズム

【2-1】傘形状取付技術の開発（高木綱業，県産技センター）

樹脂外被は、絶縁ロープで使用実績があり絶縁性能が優れているウレタン樹脂を用いた。傘形状の取り付けは、従来の樹脂押出技術を改良することにより効率よく行うことが可能となり、様々な条件を変えながら試作を進めた結果、目標の『傘径 D/ロープ径 d=1.5 倍以上』となる傘形状付き絶縁ロープを開発することができた。

【2-2】注水時絶縁性能試験による性能評価（高木綱業）

開発した傘形状付き絶縁ロープの注水絶縁性能試験を(株)四国総合研究所の協力を得て実施した。

① 漏れ電流測定

注水時の傘ありと傘なしでの漏れ電流値の測定結果を図 14 に示す。図 15 の写真のように、傘なしでは水がロープ下面に連なってしまふことにより、漏れ電流が 6~10mA 程度流れるが、傘ありでは水が傘により脱落して連なりにくくなり、漏れ電流は 0.5mA 程度しか流れない。この傘あり/傘なしの比率は $0.5/6=1/12$ となり、目標である傘なしに対し『注水時の漏れ電流 1/2 以下』を達成した。

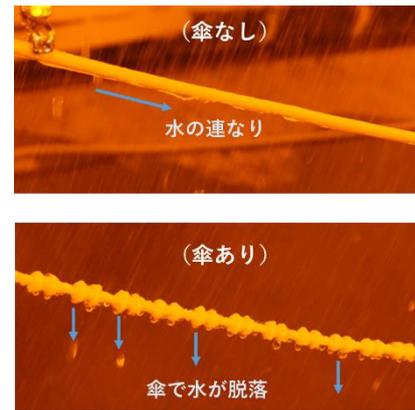
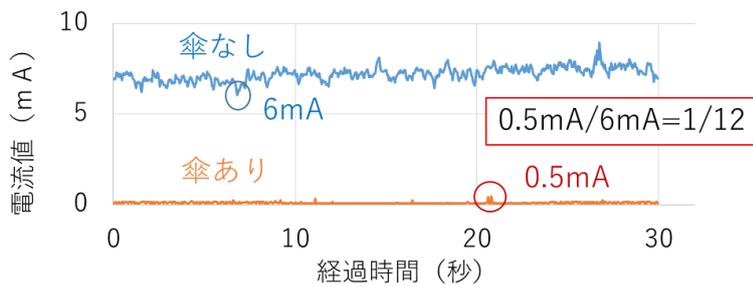


図 14 注水時の漏れ電流測定結果 図 15 水の連なりと傘による脱落状況

② 注水耐電圧測定

注水時の傘ありと傘なしでの火花放電する閃絡電圧の測定結果を図 16 に示す。このグラフに示すように乾燥状態では、傘なし・傘ありともほぼ同じ 105kV 程度で閃絡するが、注水状態では、傘なしは 45.5kV と大きく低下するのに対し、傘ありは 94.6kV と低下が抑制される。

この結果より、注水時の傘なしに対する傘ありの閃絡電圧の比率は、 $94.6\text{kV}/45.5\text{kV}=2.1$ となり、目標の「従来品に比較して注水耐電圧 2 倍以上」を達成した。

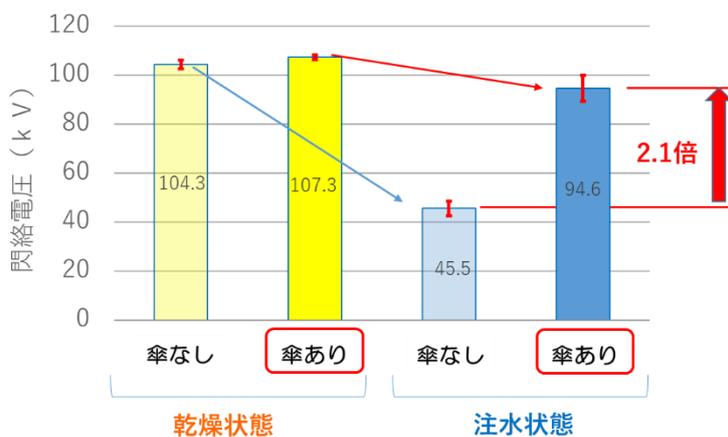


図 16 注水時の耐電圧（閃絡電圧）測定結果

傘形状付き絶縁ロープは、送電線や変電所などの充電部近傍に天候に関係なく長期にわたり設置される区画ロープなどのニーズが見込まれる。

【3】非破壊全長点検技術の開発

高強度型絶縁ロープは樹脂外被で覆われており、強度低下の原因となる内部の繊維の摩耗や損傷および絶縁性能の低下を目視や触感で確認することができないため、電力送配電会社および施工会社からはこれらの全長にわたる点検技術の開発が強く要望されてきた。

このため、今回、電気的性能、外観および機械的性能を全長にわたって非破壊で点検する技術を開発した。点検技術およびその装置の開発は、アドバイザーである産総研および(株)四国総合研究所からそれぞれ指導・助言を受けた。

【3-1】電気的性能点検技術の開発（高木綱業）

従来の送電線工事などで用いられる絶縁棒は、図 17 に示すように電極を取り付け、電圧を印加して絶縁性能を点検することが定められている。しかし、高強度絶縁ロープの絶縁性能の点検方法については定められておらず、絶縁棒に準じた試験を行うにしても、数 100m のロープ全長を試験することは時間とコスト的に困難であった。

このため、全長にわたり非破壊で連続的な電気的性能（絶縁性能）を点検する技術を開発し、内部繊維の湿潤が判定できるとともに、漏れ電流が『mA オーダーで記録可能』であること、点検スピードは『10m/分以上』の目標を達成した。本装置の開発はアドバイザーである(株)四国総合研究所の指導・助言を受けながら開発を進めた。

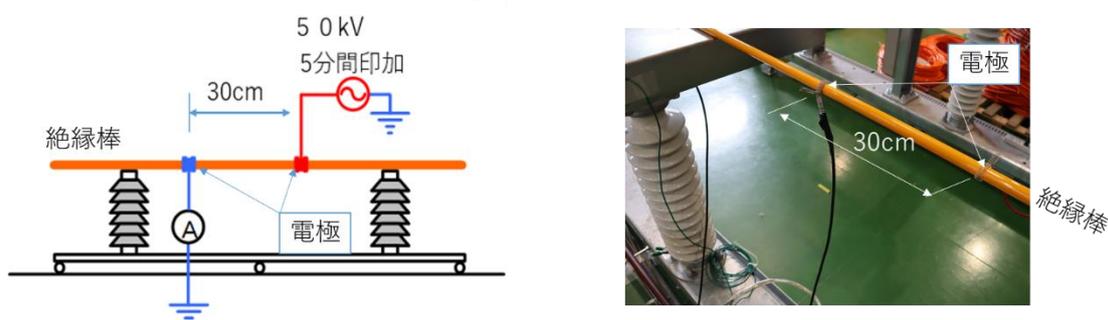


図 17 従来の絶縁棒の絶縁性能試験方法

① 電極の開発

電極はローラ型の電極とし、この中を約 10m/分のスピードでロープを通過させ、連続した漏れ電流測定を可能とした。また、電流測定電極には遮蔽ボックスを取り付けることにより、雑音となる空中を流れる電流をアースに流し、純粹にロープを流れる電流のみを測定することで測定精度を高めた。

② 連続耐電圧試験装置の開発

開発した連続耐電圧試験装置の概要を図 18 に、設置状況を図 19 に示す。

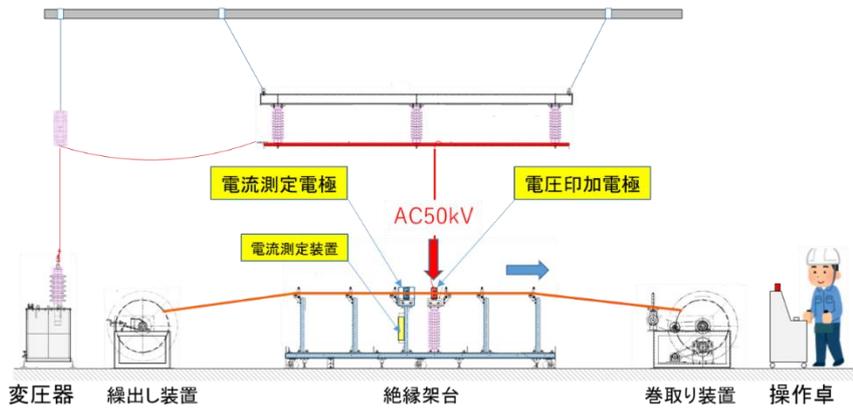


図 18 絶縁ロープ連続耐電圧試験装置の概要



図 19 絶縁ロープ連続耐電圧試験装置の設置状況

今回開発した連続耐電圧試験装置を用いて、電圧 50kV を加えながら実際のロープを 10 m/分のスピードで走行させた時のロープを流れる電流の分布を図 20 に示す。

これより、健全な部分については数 μ A の電流であるが、内部の繊維が湿潤または吸湿したのものについては、大きな電流が流れることが分かった。良否判定基準については、30 μ A 程度とすることが妥当と考えられる。

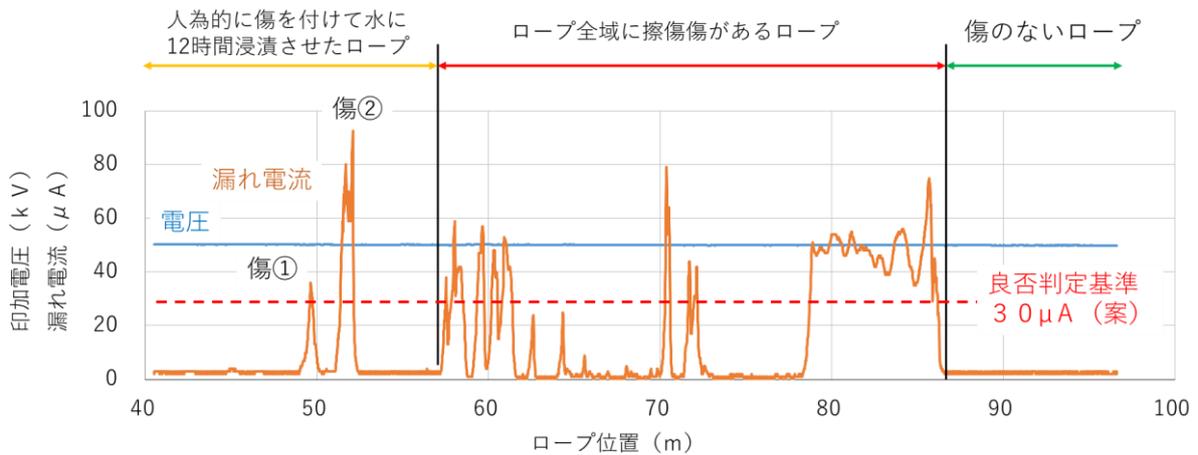


図 20 実際のロープの連続耐電圧試験結果

【3-2】外観点検技術の開発（高木綱業）

現在、図 21 に示すように人が目視と触感で行っている外観点検を効率化するため、樹脂被覆の損傷を『直径 1 mm以上のピンホールを検出可能』、『点検スピードは 10m/分以上』とする外観点検技術を開発した。

本技術の開発についてはアドバイザーである産総研の指導・助言を受けながら開発を行った。



図 21 人による外観点検状況

① 傷検出センサの開発

現場で使用したロープは泥や油で外観が汚れており、汚れと傷を識別することが外観点検装置を開発する上での大きな課題であった。当初、最新の画像処理技術を用いることを検討したが、この課題がクリアできる見通しが立たなかったため、香川県産業技術センターが開発した触覚センサのアイデアをもとに、汚れは検出せずに傷のみを検出できる傷検出センサを開発した。

この傷検出センサを用いて、図 22 のように直径 1 mmのピンホールをあけたロープを 10m/分の速度で走行させ、ピンホールを確実に検出できることを確認した。

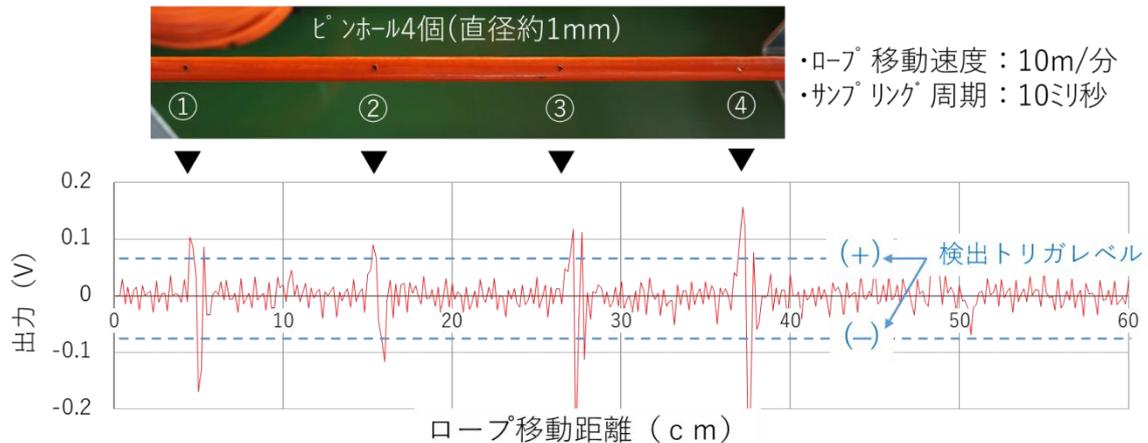


図 22 ピンホールの傷検出波形

② 外観点検装置の総合開発

外観点検装置は、図 23 に示すように連続耐電圧試験装置のラインに組み込み、10m/分でロープを走らせながら耐電圧試験と同時に外観点検を行う。

装置は、「傷検出センサ」が検出した個所を中心に前後指定距離の間のみを「動画撮影装置」で撮影記録し、この動画を人が確認して傷を確定する。また、傷の位置が後でわかるように、速乾かつ簡単に拭き取れるスプレーで傷検出部にマーキングする「傷マーキング装置」を開発した。図 24 に実際に取得した傷個所の動画の例を示す。

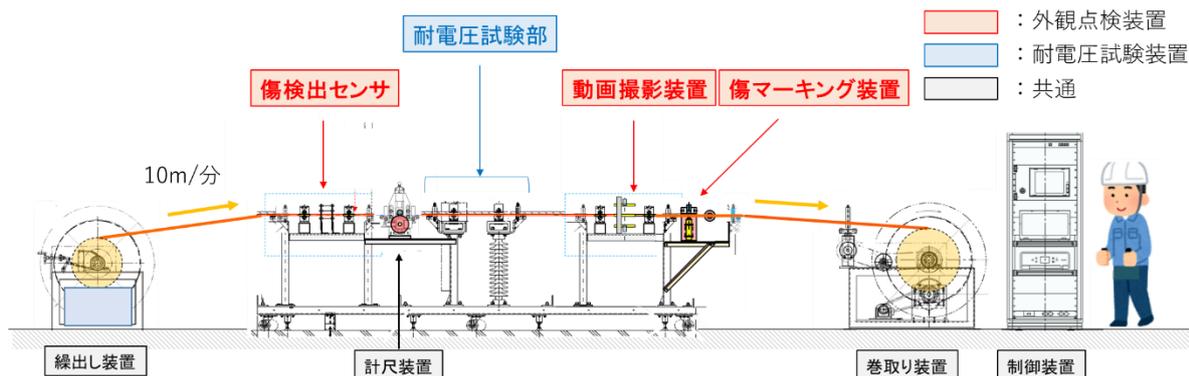


図 23 外観点検装置の概要

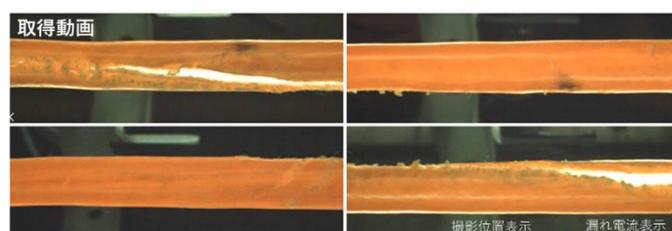


図 24 傷検出個所の動画画像（4方向全周撮影）

【3-3】機械的性能点検技術の開発（高木綱業，県産技センター）

高強度型絶縁ロープは、樹脂外被で覆われており内部の繊維の摩耗や損傷の状況が見えず、一般のロープのように外観や触感により強度低下を判断することができない。このため、現状ではロープの端を切断して残存強度試験を行っているが、中央部など端部以外は切断によりロープ長が短くなり再使用できなくなることから、残存強度試験ができないのが実情である。

今回の開発においては、残存強度と相関があると考えられる伸び率（弾性係数）を全長にわたって高精度で測定することが有効であると考え、「ロープ連続伸び試験装置」を開発するとともに、本装置を用いて伸び（弾性係数）と残存強度の相関を見出すこととした。

一般的に施工会社におけるロープ廃棄基準は残存強度 70%であることから、ロープ繊維の燃り締めなどの不確実さを考慮し、『20%以上の強度低下を検出』できることを目標とした。

本技術は、アドバイザーである産総研から指導・助言を受けて開発を進めた。

① ロープ連続伸び試験装置の開発

ロープの伸びを全長にわたり精度良く測定するために、図 25 に示す「ロープ連続伸び試験装置」を開発した。

本試験装置は、クランプ部でロープを傷つけないこと、張力をかけたときにロープが滑らないこと、伸びを 0.1mm 単位で精度良く測ることなどをポイントに開発を行った。

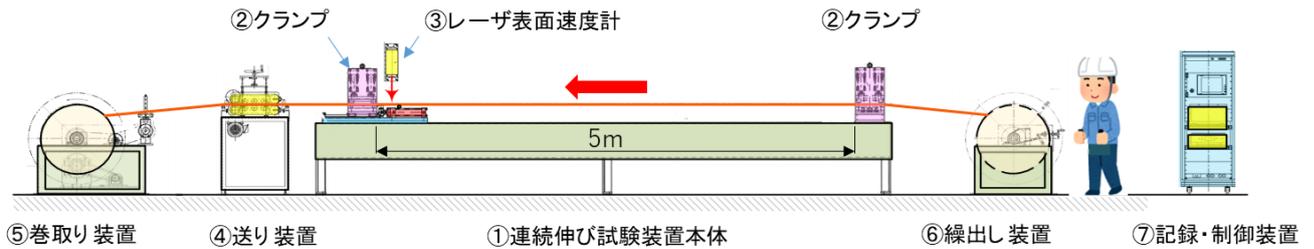


図 25 ロープ連続伸び試験装置の概要

② 伸びと残存強度の相関

ロープに張力をかけた時の張力と伸びの測定例を図 26 に示す。

伸びと残存強度の相関を求めるために、大量の使用済ロープを連続伸び試験装置を用いて伸び測定を行って弾性係数を計算し、測定したロープの中から試料を切り出し、残存強度試験を行った。その結果、残存強度 20%の低下は弾性係数 10%程度の低下から推定でき、目標である『20%以上の強度低下の検出』が可能となった。

今後、様々な種類とサイズのロープで測定実績を積み重ね、本手法の適用範囲を明確にするとともに精度を高める。

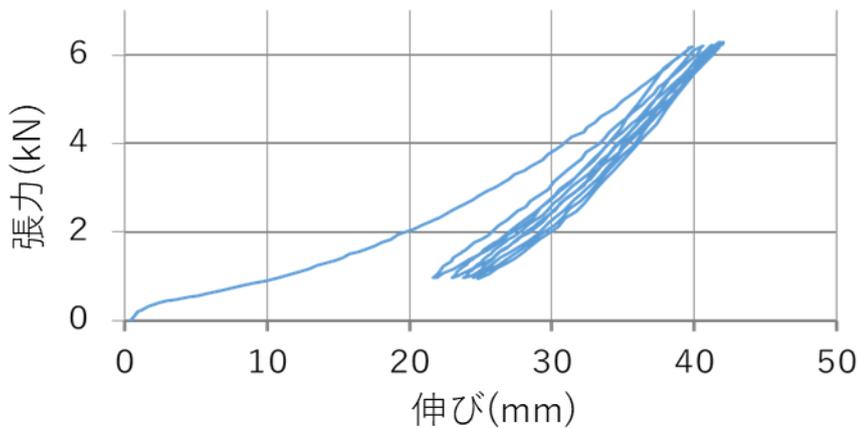


図 26 張力ー伸び測定と弾性係数計算方法

【3-4】非破壊全長点検技術の評価（高木綱業，県産技センター）

各種点検の膨大な測定データを効率的に処理し、客観的に合否判定できるようにするためのソフト開発を行った。ロープ位置（計尺長）を横軸として各点検結果をグラフ化した例を図 27 に示す。各点検結果と外観点検装置の画像を総合して、目標の『再使用の可否判断ができる』技術を開発した。

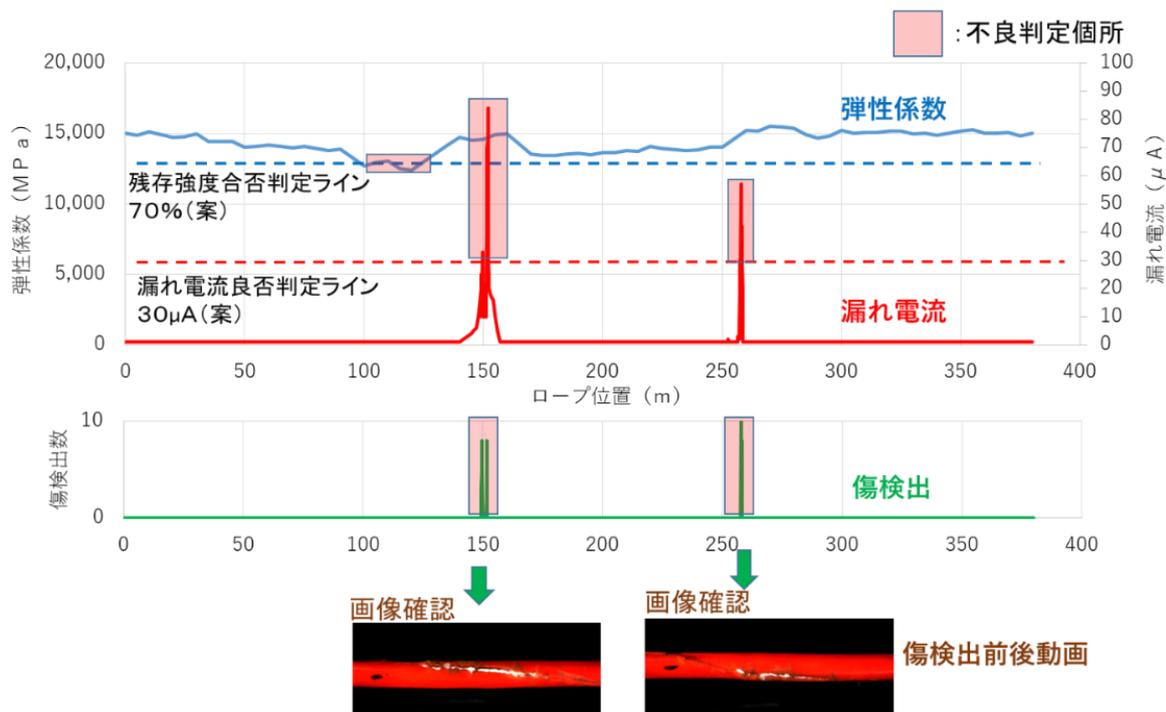


図 27 総合評価の例

高強度型絶縁ロープの使用による劣化形態は、①被覆の傷とこれによる絶縁性能低下、②ロープ内部での繊維のダメージによる強度低下 に大きく分けられる。

①の傷と絶縁性能の低下は、特に雨水が傷から内部の繊維に浸透し、絶縁性能の低下を引き起こすことが問題となる。傷と絶縁性能は、今回開発した外観点検装置と連続耐電圧試験装置を用いて同時に全長にわたり点検できるようにした。

②の強度低下は、絶縁ロープでは表面の被覆により内部の繊維のダメージの状態が見えないことから外観検査では検出できない。このため、本研究開発では、全長にわたる弾性係数の分布を測定する連続伸び試験装置を開発するとともに、ロープの弾性係数が小さいと残存強度も小さいという相関を求め、全長にわたる弾性係数の分布から残存強度の分布を推定できるようにした。

このように、ロープ全長にわたり被覆の傷と絶縁性能、強度低下の3つの劣化を非破壊で全長にわたり自動点検することにより、はじめて使用済高強度型絶縁ロープの総合的評価および『再使用の可否判断が可能』となった。

第3章 全体総括

3-1 研究開発成果

(ロープ製造技術)

従来の高強度型絶縁ロープのみならずワイヤーロープをも大きく上回る耐疲労性能を有する高耐疲労高強度型絶縁ロープを開発した。

また、降雨時においても絶縁性能の低下が小さく、従来品の倍程度の耐電圧を有する傘形状付き絶縁ロープを開発した。

(ロープ点検技術)

連続耐電圧試験装置および連続伸び試験装置を開発するとともに外観点検装置を開発し、高強度型絶縁ロープの非破壊全長点検が可能となった。これらの開発技術を用いることにより、使用済ロープの再使用の可否判定を客観的に精度良く行うことが可能となった。

今回の研究開発成果は、高強度型絶縁ロープを使った送電線工事等の品質と信頼度向上および安全性向上に大きく寄与できる技術と考える。

3-2 研究開発後の課題・事業化展開

(ロープ製造)

今回開発した高耐疲労高強度全天候型絶縁ロープ（高耐疲労高強度型絶縁ロープ、全天候型絶縁ロープ）を早期に製品化し、実際の工事現場での使用実績を積んだうえで、積極的に市場に投入する。

(ロープ点検サービス)

開発した点検装置と技術を用いて、現在、試験的に施工会社が使用したロープの点検を行っている。これらの実績と得られた知見をもとに、具体的な試験方法をマニュアル化し、早期に事業化を図る。

(市場開拓、PR)

電力送配電会社、施工会社等と連携をとりながら、新製品ロープと点検サービスの市場への浸透を図る。また、技術資料やPR資料を整備するとともに、業界紙への投稿や展示会への参加など、積極的に全国展開を進める。

(知的財産権)

関係する必要な特許について戦略的に検討し、早期に出願する。

(2020年9月特許出願済 2020-151162, 特許出願準備中3件)

以上